

基于 BP 神经网络的城网供电可靠性预测方法

宋云亭¹, 吴俊玲¹, 彭冬¹, 张东霞¹, 梁才浩¹,

邱野², 陈志刚³, 吴琼², 曹静³

- (1. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192; 2. 中国南方电网公司, 广东省 广州市 510623;
3. 广东省电力设计研究院, 广东省 广州市 510600)

A BP Neural Network Based Method to Predict Power Supply Reliability of Urban Power Network

SONG Yun-ting¹, WU Jun-ling¹, PENG Dong¹, ZHANG Dong-xia¹, LIANG Cai-hao¹,
QIU Ye², CHEN Zhi-gang³, WU Qiong², CAO Jing³

- (1. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China;
2. China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510623, Guangdong Province, China;
3. Guangdong Electric Power Design Institute, Guangzhou 510600, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: Due to the fact that traditional power supply reliability evaluation is on the basis of true structure of distribution network and multi-year historical data of element reliability, so it is hard to predict long-term power supply reliability of complex urban distribution network. For this reason, the authors propose a BP neural network based method to predict power supply reliability of urban power network. Firstly, several principal characteristic quantities impacting power supply reliability indices, such as peak load, average length of overhead lines, average quantity of sectional switch of the lines, average quantity of tie switch of the lines, average quantity of distribution transformers of the lines and average capacity of distribution transformers of the line, are found out; then taking historical data of these principal quantities as input samples, the artificial neural network (ANN) is trained; finally, using the trained ANN, the power supply reliability indices of urban power network in target year can be predicted. The results of applying the proposed method to a certain urban power network show that the proposed method is effective and the adopted BP neural network possesses good convergence. By means of sensitivity analysis on relevant factors impacting power supply reliability, relevant characteristic quantities sensitive to power supply reliability indices can be obtained, on this basis power supply companies can draw up related measures to improve power supply reliability.

KEY WORDS: urban power network; power supply reliability; indices prediction; BP neural network

摘要: 传统的供电可靠性评估方法是以准确的配电网结构和

多年的元件可靠性历史数据为基础的, 难以实现城市复杂配电网远期供电可靠性指标的预测。为此文章提出一种基于 BP 神经网络的城市电网供电可靠性预测方法, 首先找出影响供电可靠性指标的几个主要特征量, 包括最大负荷、架空线平均长度、线上平均分段开关台数、线上平均联络开关台数、线路平均配变台数和线路平均配变容量, 将这些特征量的历史数据作为输入样本对人工神经网络进行训练, 利用训练好的网络就可以预测规划目标年的城市电网供电可靠性指标。对某城市电网的应用结果表明该方法是有用的, 所采用的 BP 神经网络具有较好的收敛性。通过对影响供电可靠性的相关因素进行灵敏度分析还可以获得对供电可靠性指标较敏感的相关特征量, 供电企业可以据此制定提高可靠性的相关措施。

关键词: 城市电网; 供电可靠性; 指标预测; BP 神经网络

0 引言

城市供电可靠性是指城市供电系统对用户连续供电的能力^[1]。随着经济的迅速发展和人民生活水平的不断提高, 社会对城市供电可靠性的要求也越来越高。进一步提高城市供电可靠性既是电力用户的需要, 也是供电企业自身发展所追求的目标^[2-3]。目标管理是保证圆满完成企业任务从而实现经营目的、有效发挥各层职能作用的手段。国外供电企业的可靠性管理普遍实行目标管理, 部分企业还制定了严格的奖罚措施^[4-7]。实行目标管理后, 城市电网的供电可靠性规划工作将由被动性管理转变为主

动性预防,有利于减少无序检修停电。

在目标管理工作中准确地预测城市电网的供电可靠性指标十分重要^[8-9]。传统的可靠性评估预测方法需要准确的配电网结构和多年的元件可靠性指标历史数据^[10-16]。城市电网结构复杂,数据量很大,再加上目前无法确定目标年的具体网络结构,因此无法采用传统方法对整个城市电网的供电可靠性进行评估。但是城市电网由大量的供电子网络构成,具有明显的大样本统计特征,针对这一特点,我们提出 2 种基于统计方法的供电可靠性指标预测方法,即基于历史数据的趋势预测方法和考虑相关影响因素的可靠性预测方法。本文将神经网络首次应用到城市电网供电可靠性预测中,主要介绍考虑相关影响因素的可靠性预测原理及其具体实现和应用。

1 考虑相关影响因素的可靠性预测新方法

1.1 概述

考虑相关影响因素的可靠性预测基本思想是找出影响可靠性指标的几个主要因素,例如最大负荷、用户数、架空主干线平均长度、线上平均分段开关台数等,将这些因素作为自变量,可靠性指标变化作为因变量,得出回归分析法的数学模型。此模型可以是线性或非线性的,可以是一元(只有一个自变量)或多元的(有多个自变量)。回归系数则由历史数据求出。根据这些因素的未来数值即可推算出未来的可靠性指标。这种预测方法的精度很大程度上取决于相关因素的估计精度。

人工神经网络(artificial neural network, ANN)是人工智能技术的一种,ANN 具有大规模分布式并行处理、非线性、自组织、自学习、联想记忆等优良特性,因此可以作为一种预测的先进手段^[17]。同时 ANN 还可以与模糊集合理论相结合构成模糊神经网络,可以对可靠性预测中出现的模糊信息加以处理。神经网络方法已经广泛应用于电力系统的负荷预测领域,特别是短期负荷预测^[18]。

基于 ANN 相关影响因素的可靠性预测方法具体步骤如下:1) 确定影响供电可靠性指标大小的主要因素(自变量);2) 建立非线性映射关系模型;3) 对 ANN 进行训练;4) 利用训练好的 ANN 对未来年的可靠性(因变量)进行预测。

1.2 研究中采用的 ANN 结构和算法

采用多层感知器模型和 BP(Back-Propagation)学习算法来进行供电可靠率预测。多层感知器是一

种典型的前馈神经网络,一般由输入层、隐层和输出层组成,结构如图 1 所示。图中: x_1, x_2, \dots, x_n 为输入特征矢量 \mathbf{X} 的各分量, y_1, y_2, \dots, y_m 为输出矢量 \mathbf{Y} 的各分量。

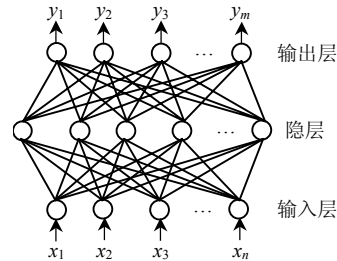


图 1 典型 3 层感知器结构图

Fig. 1 Structure of a typical three layer perception

BP 神经网络具有良好的捕捉非线性规律的特性,当隐层的神经元足够多时,3 层感知器模型可以实现任何非线性函数的逼近,即 3 层的 BP 网络可以完成任意的 I 维(输入层)到 K 维(输出层)的映射。由于神经网络结构对训练的效率 and 神经网络的推广能力至关重要,因此应慎重选择网络的输入矢量、隐层数及各隐层的神经元个数。在这里我们选择 3 层 BP 神经网络,由于输出是目标年供电可靠率指标,因此输出层神经元个数取为 1,输入层神经元个数取决于输入的特征量数目。

BP 算法是训练人工神经网络的基本方法,其基本思想是最小二乘算法。它采用梯度搜索技术,以期使网络的实际输出值与期望输出值的误差均方值为最小。在训练该网络的学习阶段,设有 N 个训练样本,训练样本号用 p 表示,隐含层第 j 个神经元的输入变量为 $v_{pj} = \sum_{i=1}^m w_{ij} O_i$, 式中 w_{ij} 为权重系数,第 j 个节点的输出为 $O_{pj} = f(v_{pj})$, 其中 $f(v_{pj})$ 为激活函数,且有

$$f(v_{pj}) = 1 / (1 + e^{-v_{pj}}) \quad (1)$$

每一样本 p 的输入输出模式对的二次型误差函数定义为

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^L (d_{pk} - O_{pk})^2 \quad (2)$$

式中: d_{pk} 为第 k 个样本的应有输出, O_{pk} 为网络输出。

BP 算法的学习训练过程由正向信号传输和反向误差传播组成。在正向传播过程中,输入信息从输入层经隐层逐层处理,并传向输出层,每层神经元的状态只影响下一层神经元的状态。如果在输出层不能得到期望的输出,则转入反向传播,将误差信号沿原来的连接通路返回,通过修改各层神经元的权值使误

差信号最小。网络连接权值调整公式为

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \eta \delta_j O_i + \alpha [w_{ij}(t) - w_{ij}(t-1)] \quad (3)$$

式中： α 是平滑因子， $0 < \alpha < 1$ ； η 为学习步长； δ_i 为反传误差信号，且有

$$\delta_j = \left(-\frac{\partial E}{\partial O_j} \right) f'(v_j) = f'(v_j) \sum_{k=1}^L \delta_k w_{jk} \quad (4)$$

式中 $f'(v_j)$ 为激发函数的导数。

由式(4)可以看出，计算本层的 δ_i 必须用到前一层的 δ_j 。因此误差函数的求取是一个始于输出层的反向传播递归过程，即通过误差函数反向传播来修正权系数。经过多个样本的反复训练，并朝减小误差的方向修正权系数，最后得到满意的结果。

2 基于 ANN 供电可靠性预测实例

采用 VC++6.0 编程实现了基于 BP 神经网络并考虑相关影响因素的城网供电可靠性预测算法。以南方电网典型城市 G 市“十一五”供电可靠性预测为例，算法的具体步骤如下：

1) 首先确定神经网络的结构。我们选择应用最为广泛的 3 层 BP 神经网络，包括输入矢量层、1 个隐含层和输出层。其中输出层神经元个数取为 1。

2) 选择 6 个参数作为神经网络的输入特征矢量，分别是最大负荷、架空线平均长度、线上平均分段开关台数、线上平均联络开关台数、平均每条线路配变台数、平均每条线路配变容量。表 1 给出了影响 G 市供电可靠性的相关因素统计表。

表 1 影响 G 市城网供电可靠性的相关因素统计表
Tab. 1 Statistical results of correlative influence factors for power supply reliability of G city

年份	最大负荷/ MW	架空线平均 长度/km	线上平均 分段开关 台数	线上平均 联络开关 台数	平均每条 线路配变 台数	平均每条 线路配变 容量/MVA	供电 可靠率/ %
2000	4021	4.8	0.7	0.4	22	12.1	99.956
2001	4509	4.6	0.85	0.6	22	12.1	99.966
2002	4960	4.41	1	0.87	21.8	10.9	99.962
2003	5817	3.53	1.07	1.02	21.3	10.7	99.959
2004	6377	3.23	1.92	1.31	20.6	10.8	99.963
2005	7280	3.32	2.18	1.36	18.8	10	99.963
2006	8038	3.41	1.7	1.01	16.11	9.7	99.964
2010	12820	3	2.5	1.5	15	8	—

3) 建立基于 BP 神经网络的映射关系模型。

4) 对输入特征矢量进行归一化。在对神经网络进行训练之前，需要对学习样本数据进行预处理，为了避免隐含层某神经元处于饱和状态，对所有的数据进行归一化处理，即

$$d_i(t) = (x_i(t) - x_0) / (x_{\max} - x_0) \quad (5)$$

式中： $x_i(t)$ 为特征参数实测值； x_{\max} 为特征参数超限阈值； x_0 为特征参数正常时阈值。在使用经过学习后的网络时，也应将实际的数据进行转化后作为神经网络的输入，对神经网络的输出数据还应进行还原计算，恢复其实际值。

5) 将归一化后 2000—2006 年的 G 市供电可靠性数据作为网络的输入样本，对网络进行训练。

6) 利用训练好的人工神经网络对 2010 年 G 市供电可靠性进行预测，预测结果为 99.9589%。

利用训练好的网络可进行相关影响因素的灵敏度分析，目的是考察各相关影响因素对供电可靠性预测值的影响程度。表 2 给出了各相关因素灵敏度分析结果。表中供电可靠率预测值的改变量以 2010 年指标预测值为基准，并且取基准值为 1。

表 2 相关影响因素灵敏度分析
Tab. 2 Sensitivity analysis on correlative influence factors of power supply reliability

相关影响因素	因素改变量/ %	供电可靠率 预测结果/%	供电可靠率 预测值的改变量
最大负荷	+10	99.958 0	-0.000 900 37
架空线平均长度	+10	99.959 2	0.000 300 12
线上平均分段开关台数	+10	99.959 5	0.000 600 25
线上平均联络开关台数	+10	99.959 8	0.000 900 37
平均每条线路配变台数	+10	99.957 0	-0.001 900 78
平均每条线路配变容量	+10	99.960 2	0.001 300 53

灵敏度分析结果表明，对供电可靠率预测结果影响的相关度从大到小的排序为：1) 平均每条线路配变台数；2) 平均每条线路配变容量；3) 最大负荷；4) 线上平均联络开关台数；5) 线上平均分段开关台数；6) 架空线平均长度。

3 结论

基于人工神经网络的可靠性预测对原始统计数据要求较高，由于本研究中用于训练的样本数较少，预测结果的精度受到一定影响。但该方法应用于 G 市城网供电可靠性预测结果仍表明 BP 神经网络具有很好的收敛性，为城市配电网供电可靠性目标规划奠定了基础。

通过对影响供电可靠性指标的相关因素进行灵敏度分析可以获得对供电可靠性指标较敏感的相关特征量，这一信息对引导供电企业制定提高可靠性的具体措施有重要的参考价值。

参考文献

- [1] 国家电网公司. 城市电力网规划设计导则[Z]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [2] 邱丽萍, 范明天. 城市电网最大供电能力评价算法[J]. 电网技术, 2006, 30(9): 68-71.

- Qiu Liping, Fan Mingtian. A new algorithm to evaluate maximum power supply capability of urban distribution network[J]. Power System Technology, 2006, 30(9): 68-71(in Chinese).
- [3] 吴建中, 余贻鑫. 一种高效的配电网供电恢复算法[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 82-86.
Wu Jianzhong, Yu Yixin. An efficient algorithm for distribution network service restoration[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 82-86(in Chinese).
- [4] Kueck J D, Kirby B J, Overholt P N, et al. Measurement practices for reliability and power quality[R]. US: Department of Energy, 2004.
- [5] Pataki G E. Report of the New York state energy planning board on the reliability of New York state's electric transmission and distribution systems[R]. New York: New York State Energy Planning Board, 2000.
- [6] Holland W F. Electric service reliability in Pennsylvania 2005[R]. Pennsylvania: Pennsylvania Public Utility Commission, 2006.
- [7] Florida Public Service Commission. Review of Florida's investor-owned electric utilities' service reliability in 2005[R]. 2006.
- [8] 陈文高. 配电系统可靠性实用基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [9] 蓝毓俊. 现代城市电网规划设计与建设改造[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [10] Billinton R, Allan R N. Reliability evaluation of engineering systems: concepts and techniques[M]. New York: Plenum Press, 1992.
- [11] Billinton R, Allan R N. Reliability evaluation of power systems [M]. New York and London: Plenum Press, 1996.
- [12] 郭永基. 电力系统可靠性分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [13] 郭永基. 可靠性工程原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [14] Willis H L. Power distribution planning reference book[M]. US: Marcel Dekker Inc., 2004.
- [15] Brown R E. Electric power distribution reliability[M]. New York: Marcel Dekker, 2002.
- [16] 宋云亭, 郭永基, 程林. 电力系统可靠性基本数据的统计分析[J]. 继电器, 2002, 30(7): 14-16.
Song Yunting, Guo Yongji, Cheng Lin. Statistical analysis of reliability data for power system components[J]. Relay, 2002, 30(7): 14-16(in Chinese).
- [17] 陈允平, 王旭蕊, 韩宝亮. 神经网络原理及其应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [18] 牛东晓, 曹树华, 赵磊, 等. 电力负荷预测技术及其应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.



宋云亭

收稿日期: 2008-01-14.

作者简介:

宋云亭(1972—), 男, 博士, 主要研究方向包括电力系统规划与可靠性、电力系统分析与控制等,
E-mail: syt@epri.ac.cn;

吴俊玲(1978—), 女, 工程师, 主要研究方向为配电网规划、系统分析;

彭冬(1977—), 女, 工程师, 主要研究方向为配电网规划、系统分析;

张东霞(1964—), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统规划、分析与控制;

梁才浩(1978—), 男, 博士, 主要研究方向为配电网规划、系统分析等。

(编辑 李兰欣)

言茂松教授新著《现代电力市场及其当量电价》由中国电力出版社出版发行

上海大学言茂松教授的新著《现代电力市场及其当量电价》已于 2008 年 9 月由中国电力出版社出版发行。该书指出了西方电力市场的三大教训, 并提出了有别于传统电力市场概念的现代电力市场三大原则。认为现代电力市场必须直面寡头和市场短缺的格局, 在寡头和缺电情况下, 电价机制也要像完全竞争市场那样诱导发电厂商自动按全额容量和真实电量成本报价, 既要保持市场的效率和稳健, 实现成本发现和优化功能, 又要给予电力公司以充分的回报, 实现电力工业高效、稳健和可持续发展。

该书不仅提出问题, 而且发展了当量电价的科学理论和方法。在边际成本理论的基础上, 引入政府给出的“参考系”, 实现容量成本的自动补偿, 还引入了围绕“参考系”的双向调控, 实现无条件的“囚徒困境式”的博弈均衡, 从而有了完全不同于传统电力市场的优良系统特性, 实现了现代电力市场的三大市场原则, 而这在传统电力市场中是不可想象的。该书还结合电力市场运行的诸多特点, 给出了水电、备用、AGC(自动发电控制)、输电以及输电堵塞管理等一系列当量电价方法及其数学模型, 并求取其均衡的数值解, 从而使得当量电价形成了一个初步的定价体系。

该书概念清楚, 逻辑严密, 有很强的科学性和原创性, 对于解决我国电力市场的现实问题, 推动电力市场的理论发展有重要意义, 特别是有利于化解目前电力改革中政府所面临的两难处境。该书特别适合政府官员, 电力公司发、输、配电各环节的运行管理人员, 电力市场研究、规划、设计、开发、运作人员, 大、中用户用电管理人员, 从事电力系统及其自动化、电力经济及其管理的科研工作者、大专院校相关专业师生等阅读。

该书近 25 万字, 定价 25 元。